

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 628.16

Методы обеззараживания воды электрическими разрядами

Э. А. Азизов, А. И. Емельянов, В. А. Ягнов

ГНЦ РФ "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований",
г. Троицк, Московская обл., Россия

Дан анализ возможности применения бактерицидного действия явлений, сопровождающих электрические разряды в жидкости, иницированные различными способами. На примере экспериментального исследования работы конкретного устройства показаны преимущества использования обнаруженного нового эффекта, характерного для разрядов, иницированных и сформированных в затопленной струе жидкости.

Одним из первых предложений по применению импульсных электрических разрядов в жидкости был метод использования его бактерицидных свойств [1]. Для полного обеззараживания воды необходима энергия $W = 3-4$ МДж/м³ [2-4]. В работе [2] сообщается, что среди явлений, сопровождающих импульсный электрический разряд в воде, наибольшим бактерицидным действием обладают ультрафиолетовая радиация и ударная волна, причем на долю коротковолнового излучения приходится до 80 % уничтоженных болезнетворных клеток при условии перемешивания жидкости. В [4] и [5] также отмечается, что обеззараживание воды происходит в непосредственной близости к межэлектродному промежутку (МЭП). На расстоянии от канала электрического разряда $r > 3-4h$ (где h — межэлектродный зазор) бактерицидный эффект незначителен [5]. Поэтому устройства выполняются многоэлектродными [6] и работают при высоких напряжениях в частотном режиме, что определяет соответствующие требования к источникам питания [7]. Тем не менее КПД подобных устройств низок, так как большая часть вложенной электрической энергии переходит в энергию ударной волны, велики предпробойные потери, а на долю ультрафиолетового излучения, согласно расчетам, сделанным в монографии [8], приходится лишь около 10 % энергии. Кроме того, возникновение ударных волн высокой интенсивности предъявляет повышенные требования к механической прочности устройств.

Представляется более перспективным применение в устройствах для обеззараживания жидкости, медицинских стерилизаторах и т. п. пленочных электрических разрядов с развитой поверхностью излучения, сформированных в зоне вязкого перемешивания затопленной струи

жидкости [9-12]. В этом случае ударная волна практически не возникает, и разряды являются наилучшими преобразователями электрической энергии в энергию излучения, поскольку электрический пробой в специальном образом возмущенной жидкости имеет ряд качественных особенностей, выгодно отличающих его от пробоя в обычных условиях. В данной работе приведены результаты испытания устройства для обеззараживания воды в двух режимах. В первом режиме разряд осуществлялся обычным образом в невозмущенной жидкости, во втором (при прочих равных условиях) — в затопленной струе воды.

На рис. 1 показаны конструкция устройства и электрическая схема.

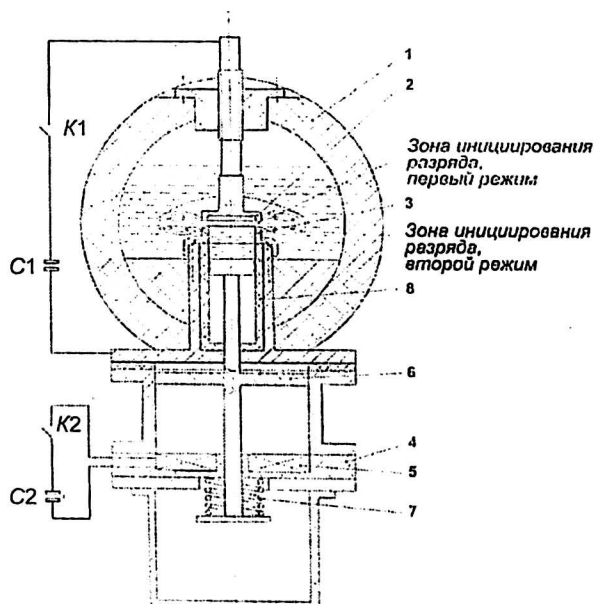


Рис. 1. Конструкция устройства и электрическая схема

В цилиндрической камере 1 диаметром 250 мм и длиной 300 мм, изготовленной из капролона, устанавливались на фиксированном расстоянии $h = 5$ мм друг от друга полые цилиндрические электроды 2 и 3 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Наружный диаметр электродов $D = 50$ мм, а внутренний $d = 42$ мм. Параллельно электродам подсоединена цепь, состоящая из коммутатора $K1$ и емкостного накопителя энергии $C1 = 16$ мкФ. К камере устройства пристыкован индукционно-динамический привод 4, состоящий из индуктора 5, якоря (поршня) 6 и возвратной пружины 7. К индуктору посредством коммутатора $K2$ подключена емкость $C2 = 400$ мкФ, заряжаемая до 3,5 кВ. Индуктор выполнен из медной шины в виде плоской спиральной катушки с внутренним диаметром 20 мм и внешним 150 мм и числом витков 140, размещенной в корпусе из стеклотекстолита СТЭФ-1 и залитой эпоксидным компаундом. Торцы камеры были заглушены фланцами из кварца. В камеру заливалось $\sim 4,5$ л жидкости. При этом МЭП был ниже уровня воды не менее чем на 50 мм. Объем жидкости, заполнявшей полость нижнего электрода 3 и рабочего цилиндра 8, составлял 54 см^3 .

В исследованиях использовалась дистиллированная вода проводимостью $\sigma_0 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ См/м, водопроводная вода с $\sigma_0 = 2,8 \cdot 10^{-2}$ См/м и 5%-ный раствор NaCl в воде с $\sigma_0 = 1,7$ См/м. В режиме, когда МЭП заполнен невозмущенной жидкостью, после срабатывания коммутатора $K1$ к верхнему электроду 2 прикладывался импульс напряжения отрицательной полярности с амплитудой до 20 кВ и скоростью нарастания 1 кВ/мкс.

Во втором режиме импульс напряжения подавался с задержкой во времени $\tau = 0,5 - 2$ мс относительно срабатывания коммутатора $K2$. К этому времени из МЭП, как из сопла, истекала вытесняемая поршнем 6, затопленная струя воды.

Осциллографирование импульсов напряжения и тока производилось по известной методике. Падение напряжения на МЭП измерялось двухплечевым омическим делителем напряжения с компенсацией индуктивной составляющей. Ток разряда регистрировался в диапазоне 50 А — 50 кА поясом Роговского с интегратором-усилителем. По осциллограммам определялись такие характеристики, как время задержки пробоя $t_{b,d}$, предпробойный ток $I_{p,b}$ и пороговое напряжение пробоя U_b — минимальное напряжение, при котором обеспечивался пробой МЭП.

Волновое сопротивление контура $\rho = 0,6$ Ом выбиралось таким, чтобы изменение тока и напряжения в предпробойной стадии разряда имело аperiодический характер, а при пробое — колебательный.

Интегральная за импульс тока энергия излучения разряда измерялась пьезоэлектрическим приемником, а давление в плазменном канале — пьезодатчиком на основе керамики ЦТС-19 [13]. Динамика внедрения струи в неподвижную воду, структура струи и эволюция электрического разряда наблюдались методом теневой покадровой съемки в проходящем свете с помощью скоростного фоторегистратора ВФУ-1. В отдельных экспериментах подсветка не использовалась, и регистрировалось только излучение разряда. Для получения контрастных снимков и качественного представления о спектральном составе излучения разряда применялись фиолетовые и желтые светофильтры. Съемка производилась на пленку РФ-3.

Осциллограммы падения напряжения на МЭП, тока и синхронно полученные фотографии развития электрического пробоя в невозмущенной жидкости (рис. 2) при работе устройства в первом режиме типичны для низковольтного пробоя воды с начальной проводимостью $\sigma_0 = 1 - 10^{-3}$ См/м [1, 8, 14].

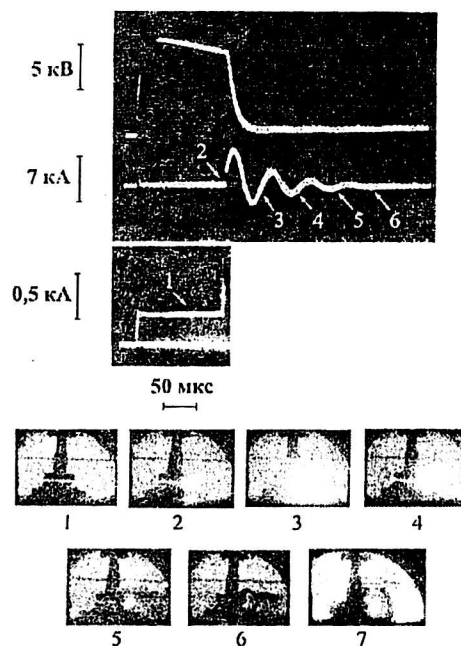


Рис. 2. Осциллограммы тока, напряжения на МЭП и теневые фотографии разряда в первом режиме (техническая вода).

Время экспозиции кадра 25 мкс. Интервал между кадрами 6 и 7 — 375 мкс. Плотность светофильтра при съемке кадра 7 в два раза меньше, чем при съемке остальных

Так, зафиксирована относительно длительная предпробойная стадия $t_{b,d} = 10^{-5} - 10^{-3}$ с, когда через МЭП протекает практически постоянный ток $I_{p,b} = 150 - 450$ А, величина которого определяется проводимостью воды, а напряжение медленно экспоненциально снижается. Пороговое напряжение пробоя $U_b \sim 7$ кВ при начальном

давлении $P_0 = 0,1$ МПа сравнимо с оценками порогового напряжения развития перегретой неустойчивости при так называемом тепловом пробое [8]. На предпробойной стадии теряется от 10 до 70 % запасенной энергии. При этом большие значения потерь и времена задержки пробоя $t_{b,d}$ соответствуют меньшим амплитудам приложенных к МЭП импульсов напряжения. В начале предпробойной стадии разряда на кромке электрода 3, находившегося под потенциалом земли, в точке, случайным образом расположенной по его окружности, появлялось свечение. Оно имело вид диффузно излучающего шара, расширявшегося в радиальном направлении со скоростью 100–150 м/с. Постепенно свечение деформировалось, в направлении к отрицательному электроду 2, и центральная область свечения становилась более яркой. В момент, когда светящаяся область достигала противоположного электрода, происходил пробой МЭП. Ток резко возрастал ($dI/dt \sim 6 \cdot 10^8$ А/с), и разряд переходил в колебательный режим с периодом $T = 60$ мкс. Пробой происходил при напряженности $E \sim 4,5$ кВ/см. Сопротивление канала разряда (рис. 3) падает в течение первого полупериода до минимального значения $R \sim 0,05$ Ом, а в окрестности нуля тока — увеличивается и достигает максимума, который сдвигается в область следующего полупериода. Минимум сопротивления близок по времени к максимуму тока разряда, хотя также несколько сдвинут в сторону больших значений времени.

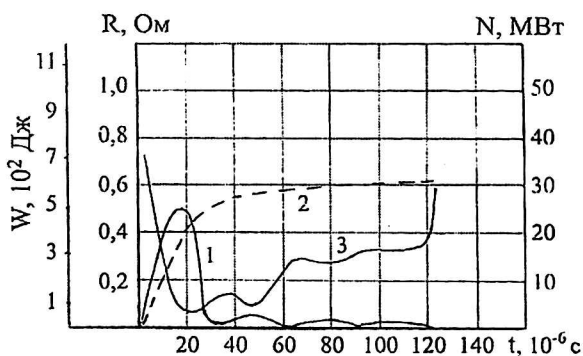


Рис. 3. Изменение во времени электрических характеристик разряда в первом режиме (техническая вода).

За ноль оси времени принят момент пробоя МЭП; 1 — мощность; 2 — энергия; 3 — сопротивление

Как показали измерения, энергия излучения плазменного канала примерно пропорциональна энергии, вводимой в разряд, и составляет ~ 30 % от запасенной энергии. Излучающим является поверхностный слой разряда, имеющего форму сферы радиусом $r_d \sim h$. Оценки показывают, что температура плазмы в канале разряда достигала $T = (10 - 12) \cdot 10^3$ К. Согласно закону смещения Вина, этому диапазону температур соответствуют длины волн $\lambda_m = 0,29 - 0,24$ мкм. С помощью

светофильтров установлено, что вблизи длины волны $\lambda = 250$ нм спектральная плотность излучения имеет максимум, а затем при увеличении длины волны плавно уменьшается.

Разряд в жидкости сопровождался генерацией ударных волн и пульсациями газового пузыря в послеразрядный период времени. В волне сжатия ближней зоны разряда в жидкости давление достигало значения $P \sim 40$ МПа.

Рабочий цикл во втором режиме начинался с создания затопленной веерной струи воды, истекающей из кольцевого сопла, образованного электродами. При скорости течения ~ 30 м/с струя становится непрозрачной вследствие рассеяния света на кавитационных пузырьках, концентрация которых, по оценкам, достигает $\sim 10^7$ см⁻³ (рис. 4). Пузырьки возникают за кромками электродов, где давление в жидкости понижается до некоторого критического значения. Когда кавитационный пузырек переносится в область повышенного давления (лобовая часть струи), происходит его схлопывание.

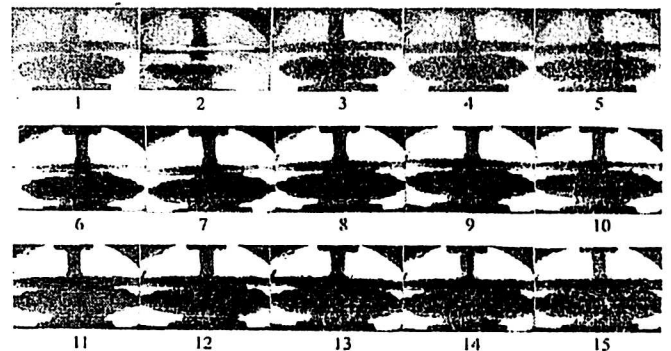


Рис. 4. Тепловые фотографии затопленной струи технической воды и разряд во втором режиме.

Время экспозиции кадра 25 мкс. Интервал между кадрами 5 и 6 — 75 мкс, между остальными соседними — 50 мкс. Плотность светофильтров при съемке фотографий 1–5 в два раза больше, чем при съемке остальных. Кадр 2 — момент времени от подачи на электроды импульса напряжения $t = 15$ мкс

В работе [15] предполагалось, что фотохимические реакции, происходящие в жидкости при кавитации, являются следствием действия ультрафиолетовых лучей, испускаемых электрическими микроразрядами в пузырьках. В [16] дано описание плазменного образования в кавитирующей жидкости, служившего источником электронного, нейтронного и рентгеновского излучений.

Во втором режиме в данном устройстве при выполнении условий, указанных в [10], зажигание разряда начинается уже на фронте импульса напряжения $U_i = 1,5 - 3$ кВ (рис. 5). Оценки показывают, что размножение электронов (лавины) происходит прежде всего внутри газовых пузырьков. Канал пробоя уходит из области

сильного электрического поля между электродами $E = 3-6$ кВ/см, прорастая под углом к силовым линиям внешнего электрического поля.

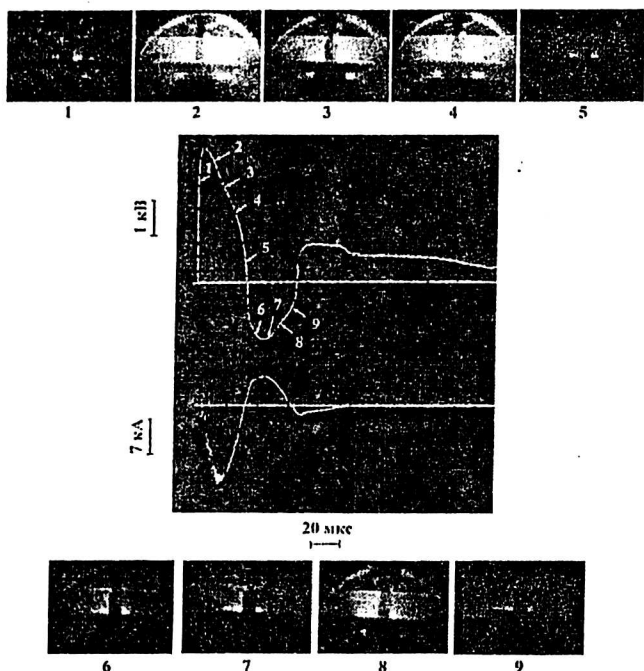


Рис. 5. Осциллограммы тока, напряжения на МЭП и фотографии разряда без подсветки во втором режиме (техническая вода).
Время экспозиции кадра 8 мкс

Вероятно, что создаются условия для усиления локальных полей по профилю струи, и ионизационные процессы, начавшиеся еще в начале истечения жидкости, проходят одновременно в ряде областей зоны смещения струи. При этом средняя напряженность электрического поля по длине разряда $l_{II} = 4-16$ см — $E_m = 0,45-0,7$ кВ/см. Особенностью разряда в присутствии струи является одновременное с напряжением нарастание тока. Поэтому, когда на фронте струи вспыхивает густая сеть яркосветящихся каналов, величина разрядного тока достигает уже нескольких килоампер. Момент замыкания электродов и образование изогнутого по профилю струи токопроводящего канала соответствуют повороту кривой напряжения.

Напряжение пробоя $U_b = 1,9 - 6$ кВ в широком диапазоне проводимости жидкости и при различной длине струи всегда ниже начального напряжения заряда емкости $U_0 = 10 - 20$ кВ. На осциллограммах тока и напряжения нет изломов, характерных для первого режима. Ток изменяется по синусоиде с периодом $T = 60$ мкс, как при короткозамкнутом МЭП. Формирование канала с высокой проводимостью завершается не позднее чем через 5 мкс от начала подачи импульса напряжения, что фиксируется по резкому падению сопротивления МЭП (рис. 6).

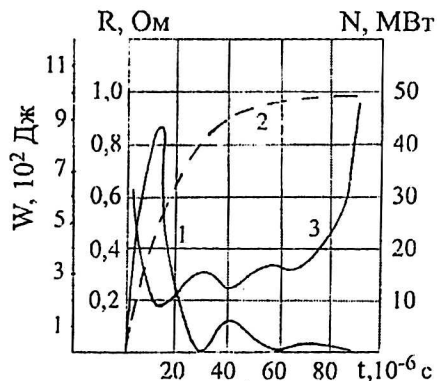


Рис. 6. Изменение во времени электрических характеристик разряда во втором режиме (техническая вода).
За ноль оси времени принят момент подачи на МЭП импульса напряжения. Длина струи $l_s = 3,5$ см, длина разряда $l_{II} = 8,6$ см:
1 — мощность; 2 — энергия; 3 — сопротивление

Было выполнено несколько серий экспериментов, в которых исследовались зависимости характеристик пробоя от начальной проводимости воды σ_0 и длины струи l_s . Установлено, что изменение на четыре порядка величины начальной проводимости воды не вызывает качественных изменений динамики процесса пробоя. Для дистиллированной воды напряжение пробоя в 1,5—2 раза больше, чем для струи с NaCl (рис. 7).

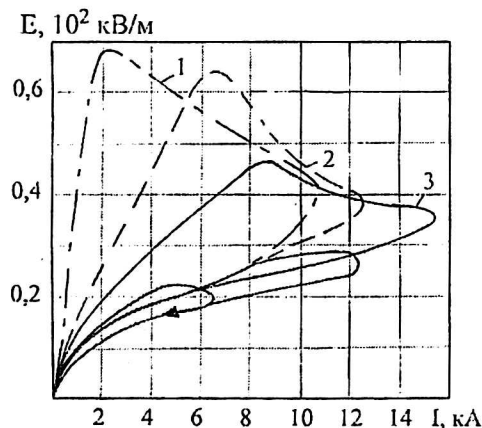


Рис. 7. ВАХ разряда во втором режиме (вода с различной проводимостью):
1 — дистиллят; 2 — техническая вода;
3 — 5%-ный раствор NaCl

Преимущества второго режима начинают проявляться для струй длиной $l_s > 1,5$ см. При этом напряжение пробоя линейно зависит от длины струи. Пленочный разряд представляет собой тонкую ($\delta \sim 1$ мм) плазменную оболочку с развитой поверхностью излучения, повторяющую форму струи жидкости. Максимум спектральной плотности излучения смещен в область более коротких, по сравнению с первым режимом, длин волн ($\lambda = 210$ нм), а энергия излучения составляет до 80 % от энергии, вводимой в разряд. При уровнях энерговыклада до 3 кДж раз-

ряд во втором режиме не сопровождается генерацией ударных волн и пульсациями газового пузыря, характерных для разряда в невозмущенной жидкости. Давление в плазменном канале, измеренное пьезодатчиком, определяется скоростью струи и близко к расчетному давлению торможения ~ 1 МПа.

Особенностью второго режима является также то, что для него характерно гашение разряда в конце третьего полупериода при переходе тока через нулевое значение, при этом на емкостном накопителе С1 остается напряжение до 1 кВ.

Воздействие электрических разрядов на техническую воду значительно снижало ее жесткость. Расположение осадочных отложений солей на дне камеры соответствовало горизонтальной проекции струи в момент инициирования разряда.

В испытаниях с пристыковкой устройства к трубопроводу движение жидкости со скоростью до 0,5 м/с вдоль камеры приводило к увеличению на 10—20 % времени задержки пробоя в первом режиме и практически не отражалось на работе устройства — во втором.

Как известно [17], бактерицидное действие ультрафиолетового излучения зависит от длины волны, интенсивности и экспозиции, в то же время оно весьма избирательно. Излучение с одинаковыми параметрами губительно для одних микроорганизмов, а для других — оказывает лишь угнетающее действие. При интенсивности излучения ниже определенного уровня могут наблюдаться даже стимуляция и рост бактерий. Поэтому для эффективного обеззараживания жидкости характеристики устройства должны быть оптимальными для каждой конкретной задачи. В частности, в [18] подчеркивается, что для предварительной оценки бактерицидного действия разряда необходимо учитывать не только количество запасенной в емкостном накопителе энергии, но и правильно выбрать величины напряжения, емкости и МЭП. Рекомендуются увеличивать число импульсов, емкость конденсаторов и величину МЭП, не доводя напряжение до высоких значений. В описываемом устройстве разряд в затопленной струе жидкости позволяет выполнить в полной мере эти требования. Действительно, во втором режиме для технической воды напряжение пробоя $U_b \sim 4,5$ кВ, величина МЭП не имеет существенного значения, поскольку длина разряда $l_d \sim 10$ см \gg h (межэлектродного зазора), и при переходе к большей емкости конденсаторов не возникает ударная волна, а увеличивается излучающая поверхность разряда. Йодометрическим методом зафиксировано также образование озона, являющегося одним из сильнейших и экологически чистых антисептиков. Для полного обезза-

раживания воды посредством разряда в затопленной струе в тесте по общепринятой методике Коха затрачивалась энергия $W \sim 0,5$ МДж/м³, что составляло восьмую часть от энергии, необходимой при работе в первом режиме.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность и целесообразность использования разряда в затопленной струе воды для эффективной деконтаминации патогенных микроорганизмов, включая их устойчивые спорные формы.

Авторы благодарят сотрудницу Центра государственного санитарно-эпидемиологического надзора в Калужской области Т. М. Казакову за полезные консультации, а также проведение необходимых тестов и проб.

Литература

1. Гульни Г. А., Малюшевский П. П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. — Киев: Наукова думка, 1977. С. 5.
2. Жук Е. Г. // Электронная обработка материалов. 1978. № 4. С. 80.
3. Юткин Л. А., Гольцова Л. И. Способ очистки питьевых и сточных вод: А. с. 196632. СССР; Б И № 18. 1983. С. 211.
4. Богомаз А. А., Горячев В. Л., Ремешный А. С., Рутберг Ф. Г. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 12. С. 65.
5. Вишневицкий И. И., Рязанов Н. Д., Семкин Б. В. и др. Установка для обеззараживания воды электрическими разрядами: А. с. 861332. СССР; Б И № 33. 1981. С. 110.
6. Блохин В. И., Высокый Ф. И., Дмитриев К. И., Ефремов Н. М. // ТВТ. 1999. Т. 37. № 6. С. 998.
7. Грехов И. В., Коротков С. В., Андреев А. Г. и др. // ПТЭ. 1997. № 5. С. 128.
8. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. — М.: Наука, 1971.
9. Азизов Э. А., Годоток В. А., Емельянов А. И., Настоящий А. Ф. // ТВТ. 1994. Т. 32. № 5. С. 643.
10. Азизов Э. А., Годоток В. А., Емельянов А. И., Настоящий А. Ф. Способ иницирования и формирования электрического разряда: Патент 1828353 РФ; Б И № 32. 1995. С. 282.
11. Азизов Э. А., Годоток В. А., Емельянов А. И., Настоящий А. Ф. Устройство для иницирования и формирования электрического разряда: Патент 2043681 РФ; Б И № 25. 1995. С. 233.
12. Азизов Э. А., Емельянов А. И., Настоящий А. Ф., Ягнов В. А. Особенности пленочного разряда вдоль поверхности затопленной струи воды: Тез. докл. XXIX Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. — М., 2002. С. 237.
13. Годоток В. А., Журавлев Б. В., Шедько И. П. // ПТЭ. 1984. № 5. С. 214.
14. Ушаков В. Я. Импульсный электрический пробой жидкости. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1975.
15. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. — Л.: Наука, 1975.
16. Колдамасов А. И. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 2. С. 188.
17. Галанин Н. Ф. Лучистая энергия и ее гигиеническое значение. — Л.: Медицина, 1969.
18. Бубенцов В. И., Жук Е. Г., Якушин Ю. В. // Электронная обработка материалов. 1983. № 5. С. 42.

Methods of water decontamination by means of electric discharges

E. A. Azizov, A. I. Emel'yanov, V. A. Yagnov

RF SRC "Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research" TRINITI,
Troitsk, Moscow region, Russia

The possibilities of utilizing phenomena accompanying various electric discharges in water such as UV radiation, shock wave, ozone formation etc. for water decontamination are analyzed. The results of experimental investigations of a device are presented which show advantages of a new phenomenon observed in electric discharge in submerged water stream for destruction of pathogenic germs.